



УДК 622.276.53

МОДЕЛЬ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ ШГНУ В ПАКЕТЕ SIMSCAPE MULTIBODY

MODEL FOR TESTING SUCKER-ROD PUMPING UNIT OPERATION CONTROL ALGORITHMS IN SIMSCAPE MULTIBODY PACKAGE

Бубнов Матвей Владимирович, аспирант, инженер каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: m.v.bubnov@urfu.ru, Тел.: +7(922)144-87-05

Зюзов Анатолий Михайлович, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. Тел.: +7(912)634-83-63

Matvey V. Bubnov, Graduate student, Engineer, Department «Electric drive and automation of industrial plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: m.v.bubnov@urfu.ru. Ph.: +7(922)144-87-05

Anatoly M. Zyuzev, Doctor Sc., Prof., Department «Electric drive and automation of industrial plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. Ph.: +7(912)634-83-63

Аннотация: Статья раскрывает основные этапы создания модели штанговой глубинной насосной установки (ШГНУ) с использованием библиотеки Simscape Multibody из программного пакета MATLAB Simulink. Модель служит для разработки различных алгоритмов управления, контроля и диагностики работы отдельных агрегатов и механизма в целом, которые входят в состав программного обеспечения станции управления ШГНУ. Подробно раскрыты вопросы использования блоков библиотеки Multibody, необходимых для наиболее полного учета особенностей конструкции станка-качалки и наиболее точного отражения в модели свойств реального объекта. Даны пояснения по поводу использования возможностей полученного инструментария для сбора и анализа данных исследуемого механизма. Приведены выводы о перспективах практического использования результатов, полученных на модели ШГНУ, а также о дальнейшем ходе разработки данного продукта.

Abstract: The article discloses the basic steps of creating a model of the sucker-rod pumping unit (SRPU) using Simscape Multibody library of MATLAB Simulink software package. The model is used for the development of different algorithms for controlling, monitoring and diagnosing operation of the individual assemblies and the whole mechanism, which are included in the software of the SRPU control station. Some issues of using Multibody library blocks, necessary for complete accounting of pumpjack design features and most accurately reflect the real object properties in the model were discussed. The explanation given for use of instrumentation capabilities for data collection and analysis of the mechanism. Inferences are prospected of practical use of the results obtained in model of SRPU, as well as the further course of the development of this product.

Ключевые слова: Simulink; Multibody; штанговая глубинная насосная установка; ШГНУ; станок-качалка; модель; станция управления; динамометрирование; ваттметрирование; диагностика.

Key words: Simulink; Multibody; sucker-rod pumping unit; SRPU; pumpjack; model; control station; dynamometry; wattmetry; diagnostics.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что добыча нефти штанговыми насосами ведется уже давно, и этот способ добычи широко распространен во всем мире, исследование режимов работы штанговых глубинных насосных установок (ШГНУ) по-прежнему является важной задачей. Согласно сложившимся правилам эксплуатации ШГНУ,

основным инструментом контроля надлежащего технического состояния установки в процессе работы является динамометрирование. По виду динамограммы специалист-технолог может различить ту или иную неисправность оборудования ШГНУ. Точность такой диагностики при этом зависит исключительно от опытности и внимательности обслуживающего персонала. Кроме того, еще одной проблемой

является необходимость установки на станок-качалку навесного оборудования – динамографа, что само по себе является трудозатратой процедурой. К тому же, надежность кабелей, подходящий к навесным приборам, размещенным на подвижных частях станка-качалки, принципиально не может быть высокой. Отсюда вытекает необходимость бездатчиковых инструментов диагностирования ШГНУ. Для разработки таких инструментов требуется получить адекватную модель, которая была бы способна отразить основные типы неисправностей, возникающих при работе ШГНУ.

Для упрощения расчета механизмов такого типа удобнее всего воспользоваться специальными прикладными пакетами для моделирования механики, в частности библиотекой Simscape Multibody из пакета MATLAB Simulink. Помимо возможности построения механических систем любой сложности, другими преимуществами выбора такого ПО можно назвать повышение точности вычислений за счет более полного учета моментов инерции тел, возможность выбора сочленений с любым набором степеней свободы, задание различных типов взаимодействия тел, визуализация движения механизма.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В статье описывается процесс создания модели дуплевого станка-качалки ПШГН8-3-5500 производства Уральского завода транспортного машиностроения. Общая схема его конструкции приведена на рисунке 1.

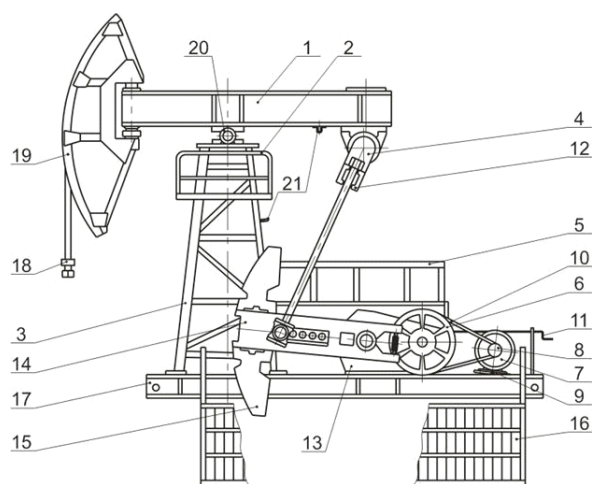


Рис. 1. Общая схема конструкции станка-качалки ПШГН8-3-5500

Для упрощения модели и сокращения времени расчета достаточно рассматривать механизм в одной плоскости. Построение модели механизма выполняется из стандартных блоков библиотеки Simulink Multibody. Для построения звеньев механизма используется блок “Body”. К таким

звеньям относятся кривошип (14, рис. 1), шатун (4, рис. 1) и балансиры (1, рис. 1). Размеры звена определяются координатами двух его концов. Кроме того, задаются координаты центра масс, который может лежать как на самом звене, так и за его пределами. Рассматриваются две основные массы – оголовка (19, рис. 1) и противовеса (15, рис. 1).

Система координат выбирается по общепринятому для данного механизма принципу таким образом, что вертикальная ось Y проходит через точку опоры и вращения балансира (20, рис. 1), а горизонтальная X – через точку вращения кривошипа. Графическая конструкция станка-качалки, размещенная в указанных осях, изображена на рисунке 2.

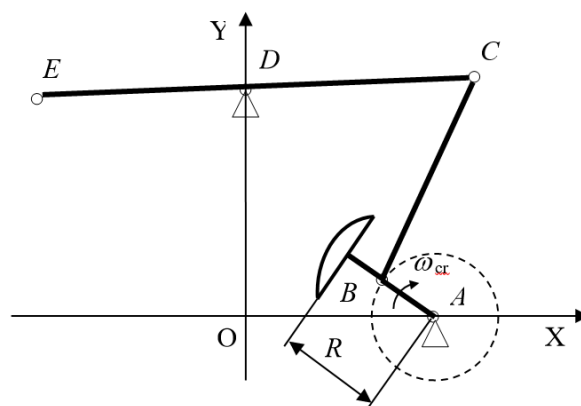


Рис. 2. Схема конструкции станка-качалки в расчетных осях

Сборка модели Multibody начинается с элемента “Ground”, представляющего собой неподвижную опору. К первому используемому элементу “Ground” присоединяется блок “Machine Environment”, который определяет параметры моделируемой среды, одним из которых является ускорение свободного падения.

Блоки “Body” соединяются с блоком “Ground” и между собой элементами из группы “Joints”, каждый из которых обладает различным количеством степеней свободы. Для этого в модели станка-качалки были использованы блоки типа шарнирного соединения “Revolute” с одной вращательной степенью свободы. К таким соединениям относятся опора балансира (20, рис. 1), крепления шатуна (4, рис. 1) и выходной вал редуктора (13, рис. 1). В качестве оси вращения выбирается перпендикулярная плоскости механизма ось Z .

Следующий немаловажный элемент модели – редуктор (13, рис. 1) и клиноременная передача (6, рис. 1). Они моделируются с помощью элемента “Gear Constraint”, имитирующего собой соединение двух шестерен, в параметрах которого

задаётся требуемое передаточное отношение. Для упрощения модели на данном этапе редуктор и клиноременная передача моделируются только общим передаточным отношением, без учета зазоров зубчатой и растяжения упругой передачи. Вся конструкция приводится в движение двигателем марки 4A200L6Y3 (7, рис. 1). Его модель описана на основе уравнений асинхронного двигателя, записанных в обобщенных переменных в двухфазной системе координат, неподвижной относительно статора.

Multibody позволяет вывести графическое изображение моделируемого объекта при запуске расчета, что даёт пользователю наглядную картину о взаимном расположении и движении частей механизма. На рисунке 3 приведено положение механизма, которое позволяет рассмотреть все его ключевые особенности: верхняя мертвая точка. Обо всех остальных особенностях будет сказано ниже.

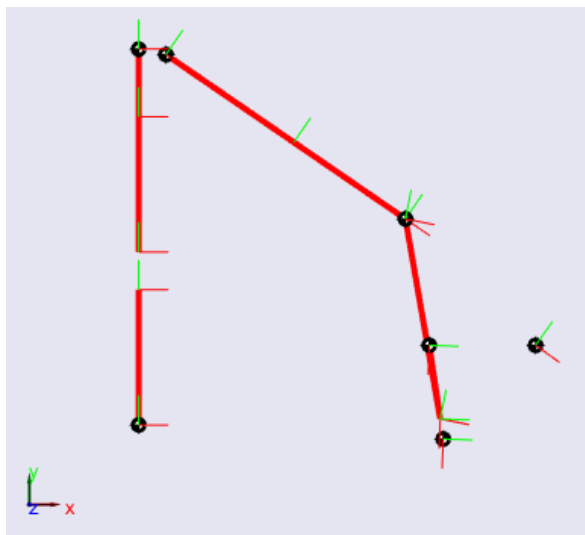


Рис. 3. Верхняя мертвая точка

Далее перейдем к моделированию оголовка балансира (19, рис. 1), являющийся неотъемлемой частью конструкции любого станка-качалки. Особая форма оголовка позволяет точке подвеса штока (18, рис. 1) в процессе движения механизма оставаться на одной вертикальной прямой над устьем скважины, не допуская тем самым перекоса и затирания штока. Выпуклая форма оголовка представляет собой дугу окружности с центром в опоре балансира и радиусом, равным длине переднего плеча балансира. То есть, оголовок балансира можно рассматривать как часть барабана, на который наматываются троса подвески штока при подъеме балансира и разматываются при его опускании. Очевидно, если представить оголовок шестерней, а подвеску штока – зубчатой рейкой, то перемещение, совершаемое штоком, не изменится. Но

стандартные средства Multibody не позволяют реализовать такой тип взаимодействия элементов. Поэтому решено было прибегнуть к эквивалентному решению, и представить зубчатую рейку в виде части зубчатого колеса бесконечного радиуса. Хотя сам оголовок и не виден на графическом отображении механизма, тем не менее, на рисунках 4 и 5 видно, что в крайних положениях балансира шток и колонна штанг сохраняют своё вертикальное положение.

Следующий шаг в подготовке модели – имитация движения колонны штанг и работы насоса. Эти процессы наглядно характеризуются с помощью динамограммы, представляющей собой зависимость усилия в точке подвеса насосных штанг от положения данной точки подвеса. Характерные динамограммы, полученные на модели, представлены на рисунке 4.

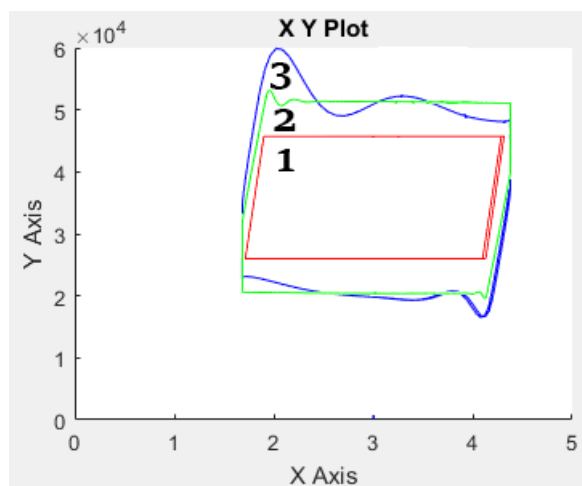


Рис. 4. Характерные динамограммы работы насоса

Динамограмма статической работы насоса (1, рис. 4) называется теоретической, поскольку не учитывает динамические усилия и силы трения, но её построение при динамометрировании является важным, поскольку позволяет дать оценку реальной динамограмме.

Для моделирования действия упругих сил в колонне штанг используется блок “Joint Spring & Damper”, который присоединен к блоку “Custom Joint” с одной поступательной степенью свободы, тем самым налагая на соединение силы упругого взаимодействия. В параметрах блока задаются коэффициент упругости, затухания и величина расстояния в недеформированном состоянии (в случае соединения вплотную оно равно нулю). Кроме того, необходимо смоделировать силу трения, возникающую между сальниковой набивкой и полированным штоком. По своей природе это сила трения покоя, которая меняет свой знак при прохождении мертвых точек. При этом шток не начнет свое движение, пока тяговое усилие не превысит силу трения покоя, что

обуславливает вертикальный участок на динамограмме.

Таким образом, указанные условия позволяют получить вид динамограмм, показанных на рисунке 4 – на полной скорости двигателя (3) и на пониженной в четыре раза (2). Общий вид полученной модели станка-качалки в Multibody представлен на рисунке 5.

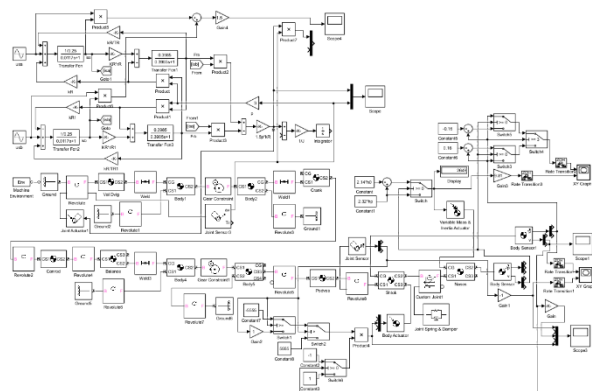


Рис. 5. Общий вид модели станка-качалки в среде Simulink Multibody

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования частично уже были представлены выше, поскольку они были необходимы для пояснения структуры модели. Важным и необходимым, конечно же, являются динамометрирование (рис. 4), поскольку оно является основным методом диагностики работы штангового насоса.

Другой важной диаграммой работы ШГНУ является ваттметрограмма (рис. 6) приводного двигателя (зависимость потребляемой электрической мощности от времени). Её достоинство в отношении динамограммы для целей диагностики состоит в том, что она может быть получена стандартными средствами без использования дополнительного навесного оборудования и датчиков. Тем не менее, она более сложна для аналитической обработки и требует разработки алгоритмической базы.

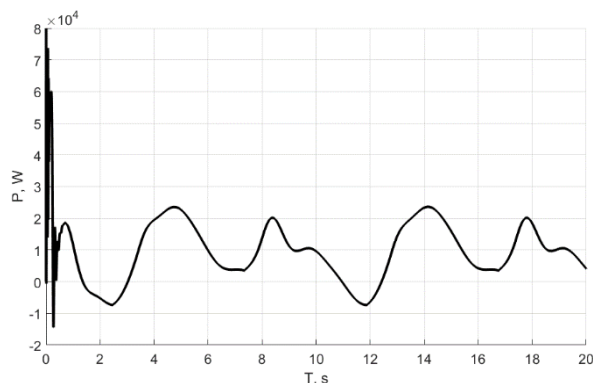


Рис. 6. Ваттметрограмма двигателя ШГНУ

Помимо всего прочего, одной из существенных проблем эксплуатации ШГНУ является уравнивание станка-качалки. Дело в том, что положение противовеса на кривошипе влияет на энергопотребление установки, и длительная работа в неуравновешенном режиме может повлечь значительные затраты для нефтедобывающей организации. Поэтому технологический персонал периодически вручную проводит процедуру уравнивания по определенной методике, в частности, методом амперметра. Но такой подход, очевидно, не может обеспечить в полной мере своевременную и точную установку противовеса в оптимальное положение. Поэтому был разработан алгоритм, который позволяет в автоматическом режиме контролировать степень уравнированности станка-качалки, а также выдавать рекомендации для обслуживающего персонала по оптимальному смещению противовеса для достижения наилучших энергетических показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана довольно подробная модель штанговой глубинной насосной установки, которая вполне удовлетворяет задачам диагностики оборудования. Она позволяет моделировать различные характерные неисправности оборудования, чтобы разработать способы и алгоритмы их выявления без использования специальных датчиков и внешних систем динамометрирования. Перспективными остаются задачи бездатчикового получения динамограммы, определения динамического уровня и забойного давления. Поэтому дальнейшие усилия будут сосредоточены на разработке и усовершенствовании модели по данным направлениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lindh T., Montonen J.-H., Grachev M., Niemelä M., Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run // IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2015. С. 416–420.
2. Fozao K.F., Lissouck M., Lontsi F., Ngasa A., Mbanda N. Hands-on model of sucker rod pumping facility for oil well production // Journal of Petroleum and Gas Engineering. 2015. № 6(4). С. 45–53.
3. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. The information processing of dynamometer cards at controllers of automation power drives sucker rod pumps // IEEE International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). 2015. С. 1–6.
4. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption // IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. С. 1-4.